การเตรียมและคุณสมบัติของแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตเจือด้วยบิสมัทออกไซด์
Preparation and Properties of Zinc Aluminium Borate Glasses Dope with Bismuth Oxide

ภัทรวจี ยะสะกะ[1,2*], สาริณี ไทรสังขสิริพงศ์[1] และจักรพงษ์ แก้วขาว[1,2]

[1]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[*]pyasaka@hotmail.com

บทคัดย่อ

ระบบแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตที่เจือด้วยไอออนของบิสมัทถูกเตรียมขึ้นจากองค์ประกอบ (80-x)B_2O_3 -10ZnO - 10Al_2O_3 -xBi_2O_3 โดย 10 ≤ x ≤ 30 (เปอร์เซ็นต์โมล ของ Bi_2O_3) ด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรต เพื่อให้เข้าใจบทบาทของ Bi_2O_3 ผลที่ได้พบว่า ความหนาแน่นของระบบแก้วที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าปริมาตรเชิงโมลมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันตามปริมาณการเจือความเข้มข้นของบิสมัทออกไซด์ เมื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,100 นาโนเมตร ของบิสมัทออกไซด์ พบว่าค่าความเข้มข้นของพีคการดูดกลืนแสงสูงขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของบิสมัทออกไซด์ นอกจากนี้ได้ตรวจสอบคุณสมบัติการเปล่งแสงของ Bi^{3+} ที่เจือในระบบแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตจากการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร พบพีคการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 602 นาโนเมตร

คำสำคัญ: แก้วซิงค์บอเรต, บิสมัทออกไซด์, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางแสง, สมบัติทางลูมิเนสเซนซ์

Abstract

Bi -dope zine aluminium borate glasses of the composition (80-x)B_2O_3 -10ZnO -10Al_2O_3 -xBi_2O_3 with 10 ≤ X ≤ 30 mol% have been synthesized by conventional melt quenching technique at 1,200 °C for 3 hours. In order to understand the role of Bi_2O_3 in zinc aluminium borate glasses systems, the physical, optical and luminescence properties were investigated. The results showed that the density increased, the molar volume increased and the Vickers hardness increased with increasing Bi_2O_3 concentrations. The optical absorption spectra of glasses were measured in the wavelength range of 200 - 1,100 nm for Bi^{3+} the intensity of all absorption bands increased with increasing Bi_2O_3 contents. The intensity of all emission bands increased with increasing Bi_2O_3 contents. In addition, the luminescence properties of Bi^{3+} -dope B_2O_3 -ZnO -Al_2O_3 -Bi_2O_3 glass system were carried out using excitation wavelengths of 320 nm for Bi2O3 the luminescence peaks around 602 nm.

Keywords: zinc borate glass, bismuth oxide, physical property, optical property, luminescence property

1. บทนำ

แก้วเป็นวัสดุโปร่งใส มีโครงสร้างอสัณฐาน ถูกทำขึ้นจากการหลอมสารอนินทรีย์และทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งแก้วจะมีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่เป็นผลึก มีโครงสร้างแบบสุ่มที่ไร้ระเบียบ แก้วที่เติมไอออนของโลหะจะได้รับความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ทางแสง [1] นอกจากนี้เป็นวัสดุที่โปร่งใส แข็งที่อุณหภูมิห้องพร้อมกันนั้นมีความแข็งแรงเพียงพอและทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังนั้น จึงทำให้แก้วเป็นวัสดุที่นิยมในงานด้านต่าง ๆ เช่น งานก่อสร้างและกระจกของยานพาหนะต่าง ๆ หลอดสุญญากาศและหลอดไฟฟ้า งานทางด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้า และเครื่องมือแก้วต่าง ๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น [2]

แก้วบอเรต เป็นแก้วอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและสามารถฟอร์มตัวเป็นแก้วได้ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ มีความหนืดสูง มีโครงสร้างของอะตอมที่ง่าย ไม่ซับซ้อน มีค่าดัชนีหักเหสูง มีสมบัติการส่งผ่านแสงดี มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดี คือไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่ายและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเช่นกัน [3] จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้แก้วบอเรตนิยมนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมแก้ว เป็นเพราะมีความแข็งแรงของพันธะสูง ในโครงสร้างบอเรตประกอบด้วยอะตอมโบรอน ($Bi^{3+)}$ จับกันกับอะตอมของออกซิเจน ซึ่งจะสามารถฟอร์มตัวเป็นแก้วได้ โครงสร้างของ BO_3 จับกันเป็นลักษณะสามเหลี่ยมอยู่ที่มุมของแต่ละพันธะในโครงสร้างแบบสุ่ม แก้วบอเรตนิยมนำมาใช้งานทางด้านวัสดุป้องกันรังสี เนื่องจากมีค่าเลขอะตอมที่มีผลใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ อีกทั้งยังนำมาใช้งานในด้านอุปกรณ์ แก้วบอเรตที่ประกอบด้วยกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ทออกไซด์ เช่น ZnO PbO TeO2 MgO Ca SrO BaO และ Bi_2O_3 จะทำหน้าที่เป็นตัวทำลายโครงข่ายของแก้วเมื่อถูกเติมเข้าไป ซึ่งจะทำให้แก้วมีความหนืดลดลง จะพบมากในการนำมาทำเป็นเส้นใยแก้วนำแสง เลเซอร์ อุปกรณ์กำบังรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา [4]

ซิงค์ออกไซด์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายในอุปกรณ์ ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่นวัสดุเปล่งแสง และเลเซอร์ไดโอด โดยอุปกรณ์เลเซอร์จะเปล่งแสงครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างในช่วงวิซิเบิล อีกทั้งมีแถบพลังงานที่กว้าง นอกจากนี้การเติมซิงค์ออกไซด์ลงในแก้วบอเรตจะช่วยเพิ่มความน่าสนใจในการทำเป็นผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ แก้วเหล่านี้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการติดตั้งจอพลาสมาที่มีการแสดงผล และคุณภาพสูง และซิงค์ออกไซด์ได้รับการยอมรับในการผลิตเป็นจอโทรทัศน์ และจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งปรากฏในงานวิจัย [5-6] ที่ ซิงค์ออกไซด์ 2^+ จะเข้าไปเชื่อมในโครงสร้างแก้วซิงค์ออกไซด์สามารถสังเคราะห์โดยลักษณะโครงสร้างจะแตกต่างกับผลึกเชิงเดี่ยว ซิงค์ออกไซด์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น ฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ จะช่วยเพิ่มจำนวนของลักษณะรูปร่างในโครงสร้าง ที่ใช้ในงานเข็มขัดนาโน เส้นลวดนาโน และแท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์สามารถนำมาพัฒนาใช้ในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุนาโนเพราะมีเสถียรภาพทางกลสูง และยังนำมาทำเป็นอุปกรณ์เลเซอร์ [7]

อะลูมิเนียม นิยมนำมาใช้งานทางด้านแก้ว และวัสดุเซรามิก เนื่องจาก มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น มีความแข็งสูง อีกทั้งยังมีความแข็งแรง มีค่าต้านทานสูง และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดของการเติมอะลูมิเนียมลงไปในแก้ว คือ เมื่อเติมเข้าไปในโครงสร้างจะทำให้ลักษณะทางกายภาพของแก้วมีความร้าว เนื่องจากมีความหนืดต่ำ และค่าต้านทานจากความร้อนต่ำ โดยปัญหาดังกล่าวนี้ ได้มีการทำการวิจัยเกิดขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้ของการเตรียมแก้ว โดยการเติมธาตุบางตัวเข้าไปเพิ่ม เช่น Cu Fe และ Ni เพื่อจะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่ง Fe จะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา [8]

แก้วบิสมัท ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมแก้ว เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติของแสงไม่เป็นเชิงเส้น นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้าน สวิตซ์ทางแสง เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูง และบิสมัท ยังเป็นตัวเลือกที่ดีในการทำตัวแปลงสัญญาณทางแสง และ เลเซอร์ อีกทั้งมีคุณสมบัติโพลาไรซ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคุณสมบัติทางแสงที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น [9]

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตที่มีการเจือด้วยไอออนของบิสมัท ($ZABB:Bi^{3+}$) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ รวมทั้งทำการวิเคราะห์อิทธิพลของความเข้มข้นของการเจือ Bi^{3+} ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้

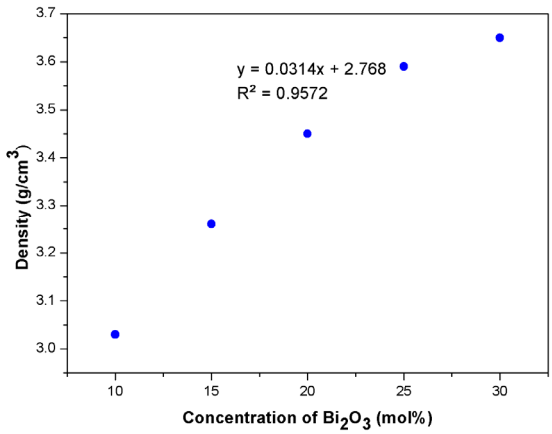
2. วิธีการทดลอง

แก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรต สูตร $(80\text{-}x)B_2O_3$ -10ZnO -$10Al_2O_3$ –xBi_2O_3 (เมื่อ x เท่ากับ 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โมล) หลอมด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Melt Quenching

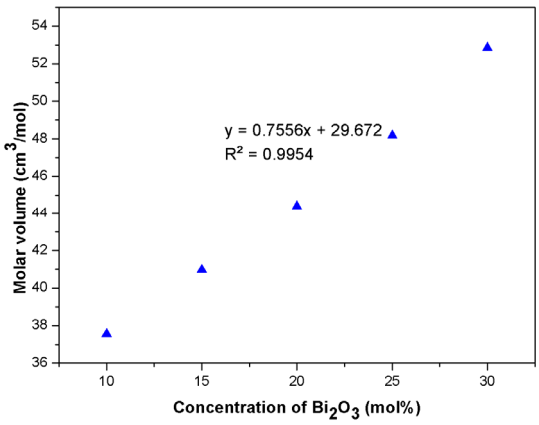
Technique) ถูกเตรียมขึ้นจากสารเคมี ดังนี้ คือ ZnO Al_2O_3 H_3BO_3 และ Bi_2O_3 ต่อมาทำการบดสารเคมีทั้งหมดให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยโกร่งบดสาร จากนั้นคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการหลอมแก้วเป็น 15 กรัม บรรจุในเบ้าหลอมอะลูมินา จากนั้นนำเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างแก้วที่ได้เข้าเตาอบ เพื่ออบไล่ความชื้นและความเครียดของแก้วที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง โดยปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมแก้วตัวอย่าง คือการนำไปตัดและขัดให้มีขนาด 1.0 ซม. x 1.5 ซม. x 0.3 ซม. สำหรับวิเคราะห์ความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมลโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (รุ่น AND HR-200 ยี่ห้อ Dietheim) การวิเคราะห์ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สโดยใช้เครื่อง Digital Micro Vickers Hardness Tester (รุ่น DHV-1000 ยี่ห้อ Enkay Enterprises) การวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (รุ่น Cary 50 Scan ยี่ห้อ VARIAN) และการวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงโดยใช้เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer (รุ่น Cary Eclipse ยี่ห้อ Agilent Technologies)

3. ผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาค่าความหนาแน่นและค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Bi_2O_3 ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0271 ± 0.0022 ถึง 3.6514 ± 0.1952 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 และค่าปริมาตรเชิงโมล แสดงในรูปที่ 2 ค่าปริมาตรเชิงโมลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 37.5490 ถึง 52.8383 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

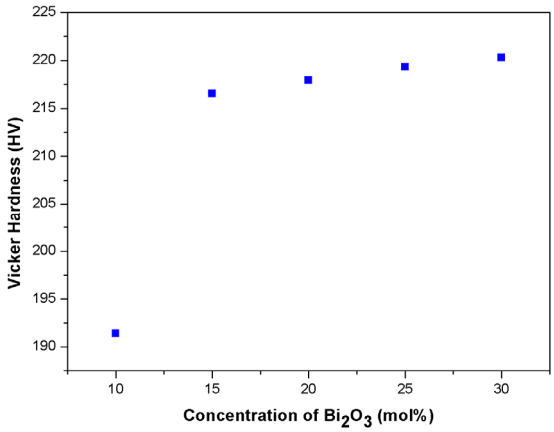


รูปที่ 1 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของแก้ว (80-x)B_2O_3 -10ZnO -10Al_2O_3 ที่เจือด้วย Bi_2O_3 ที่ความเข้มที่แตกต่างกัน



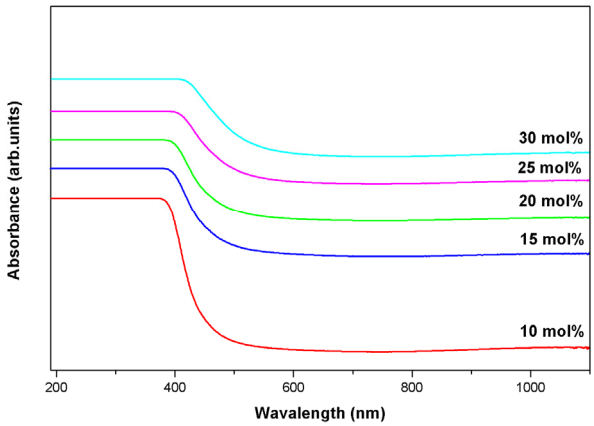
รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าปริมาตรเชิงโมลของแก้ว (80-x)B_2O_3 -10ZnO -10Al_2O_3 ที่เจือด้วย Bi_2O_3 ที่ความเข้มที่แตกต่างกัน

ผลจากการศึกษาจากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์ส ปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 ที่เติมลงไปในแก้วที่ 10 ถึง 30 เปอร์เซนต์โมล พบว่า ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการเจือความเข้มข้น Bi_2O_3 โดยมีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 191.40 ถึง 220.27 kgf/mm^2



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส ของแก้ว (80-x)B_2O_3 -10ZnO -10Al_2O_3 ที่เจือด้วย Bi_2O_3 ที่ความเข้มที่แตกต่างกัน

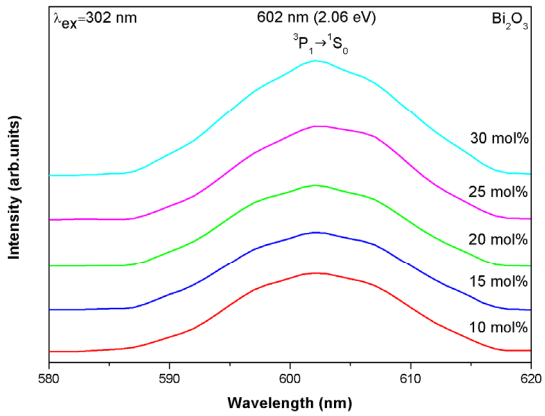
ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Bi_2O_3 ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 ถึง 30 เปอร์เซนต์โมล สเปกตรัมการดูดกลืนแสงถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,100 นาโนเมตร อยู่ในช่วง UV-VIS-NIR ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าตำแหน่งของการดูดกลืนแสง (Absorption Edge) มีการเลื่อนตำแหน่งจาก 385 ไปยัง 408 นาโนเมตร ตามปริมาณการเติม Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น คือ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โมล แสดงให้เห็นว่าการเลื่อนตำแหน่งของขอบการดูดกลืนไปยังความยาวคลื่นที่สูงขึ้นตามปริมาณการเติม Bi_2O_3 และอะตอมจับกันแบบ NBO (Non-Bridging Oxygen) โดยการเลื่อนของตำแหน่งขอบดูดกลืนของตำแหน่งขอบการดูดกลืน จะส่งผลให้การจับกันของอะตอม B-O-B แบบ BO (Bridging Oxygen) ลดลง เป็นผลของการเติม Bi_2O_3 ลงไปในแก้วซึ่งอะตอมของ Bi^{3+} จะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในโครงสร้างแก้ว



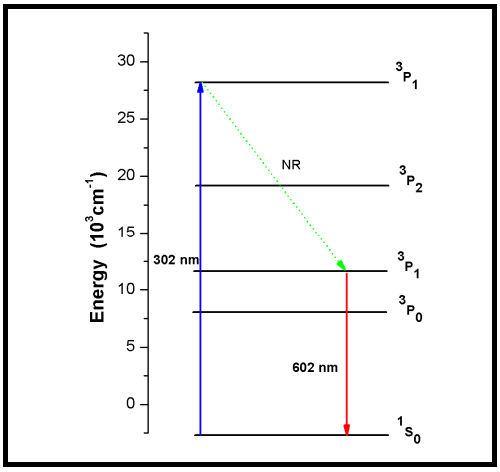
รูปที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว (80-x)B_2O_3 -10ZnO -10Al_2O_3 ที่เจือด้วย Bi_2O_3 ที่ความเข้มที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาสเปกตรัมการลูมิเนสเซนซ์ของแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตที่เจือด้วยความเข้มข้นของ Bi_2O_3 ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 ถึง 30 เปอร์เซนต์โมล สเปกตรัมการลูมิเนสเซนซ์ถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 580 ถึง 620 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้ระตุ้น คือ 320 นาโนเมตร แหล่งกำเนิดแสงคือหลอดไฟแฟลช (Xenon Flash Lamp) แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัม 1 พีค ในช่วง VIS โดยการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 602 นาโนเมตร โดนสอดคล้องกับรูปแบบ

ระดับพลังงานของ Bi^{3+} แสดงในรูปที่ 6 จากรูปจะแสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานไอออน Bi^{3+} ที่ กระตุ้นแสง เปล่งแสง และการปล่อยพลังงานในรูปของความร้อน (Nonradiative) เมื่อไอออนของ Bi^{3+} ถูกกระตุ้นที่ระดับพลังงานต่าง ๆ



รูปที่ 5 สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้ว (80-x)B_2O_3 -10ZnO -10Al_2O_3 ที่เจือด้วย Bi_2O_3 ความเข้มข้นต่างกัน



รูปที่ 6 ไดอะแกรมระดับพลังงานสำหรับการดูดกลืนแสงของ Bi^{3+}

4. สรุปผลการวิจัย

จาการศึกษาแก้วซิงค์อะลูมิเนียมบอเรตที่เจือด้วยบิสมัทออกไซด์ พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Bi_2O_3 สอดคล้องกับปริมาตรเชิงโมลมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันตามปริมาณการเจือความเข้มข้นของบิสมัทออกไซด์ ผลของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,100 นาโนเมตร อยู่ในช่วง UV-VIS-NIR ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าตำแหน่งของการดูดกลืนแสง (Absorption Edge) มีการเลื่อนตำแหน่งจาก 385 ไปยัง 408 นาโนเมตร ตามปริมาณการเติม Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น และผลของสเปกตรัมการลูมิเนสเซนซ์ถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 580 ถึง 620 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น คือ 320 นาโนเมตร พบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัม 1 พีค ในช่วง VIS โดยการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 602 นาโนเมตร ($^3P_1 \rightarrow {}^1S_0$)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่อำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับการร่วมมือและการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Gautam, C., Yadav, A.K. and Singh, A.K., 2012, “A Review on Infrared Spectroscopy of Borate Glasses with Effects of Different Additives” Journal of Hindawi, Vol.2012, pp. 1-7.
2. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. **วัสดุวิศวกรรม** กรุงเทพ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2549.
3. Varshnaya, A.H., 1994, **Fundamentals of inorganic Glasses, Academic press, San Diego.**
4. Yawale, S.S., Yawale, S.P. and Adgaonkar, C.S., 2000, **“Infrared Infrared Investigations of Some Borate Glasses”**, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, Vol.7, pp. 150-153.
5. Shinoda, T., Wakitani, M., and Kanagu, S., 2000, **“Development of Panel Structure for A High-Resolution 21-In-Diagonal Full-Color Surface-Discharge Plasma Display Panel”**, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 47, pp. 77-80.
6. Krishna Kumari, G., Muntaz Begum, Sk., Rama Krishna Ch., Sathish, D.V., Murthy, P.N., Rao, P.S., and Ravikumar, R.V.S.S.N., 2012, **“Physical and Optical Properties of Co^{2+}, Ni^{2+} Doped 20ZnO - xLi_2O - (30-X)K_2O - 50B_2O_3 (5 ≤ x ≤ 25) Glasses: Observation of Mixed Alkali Effect”,** Journal of Alloys and Compounds, Vol. 47, pp. 2646-2650**.**
7. Ahmad, F., Hassan Aly, E., Atef, M., and ElOkr, M.M., 2014, **“Study the Influence of Zinc Oxide Addition on Cobalt Doped Alkaline Earth Borate Glasses”**, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 593, pp. 250-255.
8. Liua, M., Wanga, Z., Wua, J., and Lia, G., 2015, **“Effects of Nd_2O_3 on the Mechanical Properties and Oxidation Behavior of Ti/Al_2O_3 Composites by Vacuum Hot Pressing Sintering”,** Journal of Alloys and Compounds, Vol. 643, pp. 116-121.
9. Dimitrov, V., and Komatsu, T., 2013, **“Optical Basicity and Chemical Bonding of Bi_2O_3 Containing Glasses”**, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 382, pp. 18–23.
10. Ivankoy, A., Seekamp, J., and Bauhofer, W., 2001, **“Optical Properties of Zinc Borate Glasses”**, Journal of Materials Letters, Vol. 49, pp. 209-213.
11. Fan, H., Hu, L., Yang, k., and Fang, Y., 2010, **“Structure and Physical Properties of Bi_2O_3 -B_2O_3 -Ga_2O_3 Glasses”,** Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 356, pp. 1814-1818
12. Iordanova, R., Aleksandrov, L., Bachvarova-Nedelcheva, A., Ataala, M., and Dimitrie, Y., 2011, **“Glass Formation and Structure of Glasses in B_2O_3 -Bi_2O_3-MoO_3 System”**, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 357, pp. 2663-2668.
13. Ticha, H., Kincl, M., and Tichy, L., 2013, **“Some Structural and Optical Properties of (Bi_2O_3)x-(ZnO)60 -x(B_2O_3)40 Glasses”**, Journal of Materials Chemistry and Physice, Vol. 138, pp. 633-639.
14. Swapna, K., Mahamuda, Sk., Srinivasa, A.R, Jayasimhadri, M., Shakya, S., and Vijaya, P.G., 2014, **“Tb^{3+} Doped Zinc Alumino Bismuth Borate Glasses for Green Emitting Luminescent Devices”,** Journal of Luminescence, Vol. 156, pp. 180-187.
15. แม้น อมรสิทธิ์ สมชัย อัครทิวา และ ธรรมนูญ อุดมมั่น, 2008, **วัสดุวิศวกรรม**, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, 511-513.
16. **วัสดุเซรามิก**, [online], Available: http://www.electron.rmutphysics.com. [16/11/2015].

17. ชนันญา วงษ์ดียิ่ง, 2015, **"การศึกษาคุณสมบัติของแก้วซิงค์แบเรียมบอเรตที่เจือด้วยโคบอลต์ออกไซด์และนิโอดิเมียมออกไซด์"**, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
18. วิชาการ.คอม, **Periodic Table**, [online], Available: http://www.vcharkarn.com [1/11/2015].
19. วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี**, บิสมัท**, [online], Available: https://th.wikipedia.org [07/03/2015].
20. วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, **Vickers Hardness**, [online], Available: https://th.m.wikipedia.org [15/11/2015].
21. Gordon England, Microhardness Tess, [Online], Availabla: http://www.gordon England.co.uk. [15/11/20]
22. Visiblespectrum, 2013, [online], Available: http://www.giangrandi.ch [11/11/2015].